

## Список литературы

1. Голубев В. В. Труды по аэродинамике. – М. – Л. : Гостехиздат, 1957. – 980 с.
2. Белоцерковский С. М., Скрипач Б. К., Табачников В. Г. Крыло в нестационарном потоке газа. – М. : Наука, 1971. – 768 с.
3. Довгий С. А. Аэрогидродинамика движущихся крыльев. – Киев : Издательство «Юстон», 2016. – 276 с.
4. Воропаев Г. А., Зайнер-Гундерсен Д., Коробов В. И. Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла // Прикладная гидромеханика. – 2015. – Т. 17. – № 3. – С. 3 – 9.
5. Young J., Lai J., Platzer M. A review of progress and challenges in flapping foil power generation // Prog. Aerosp. Sci. – 2014. – v. 67. – P. 2 – 28.
6. Kaya M., Elfarra M. CFD based optimization of oscillatory wing motion for maximum energy harvesting from wind // Int. J. Renewable Energy Research. – 2018. – v. 8. – no. 1. – P. 540 – 551.
7. Jasak H. OpenFOAM : open source CFD in research and industry // Int. J. Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2009. – v. 1. – no. 2. – P. 89 – 94.
8. Voropaev G. A., Zagumennyi Ya. V., Shkvar Ye. A. Vortex formation on an oscillating wing // Proc. 8-th Int. Conf. on Vortex Flows Dynamics. – Xi'an, China, 2018. – P. 25 – 26.

## References (transliterated)

1. Golubev V. V. *Trudy po aerodinamike* [Proceedings on aerodynamics]. Moscow – Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1957. 980 p.
2. Belotserkovskiy S. M., Skripach B. K., Tabachnikov V. G. *Krylo v nestatsionarnom potoke gaza* [Wing in an unsteady gas flow]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 768 p.
3. Dovgiy S. A. *Aerogidrodinamika dvizhushhikhsya kryl'ev* [Aerohydrodynamics of moving wings]. Kiev, Izdatel'stvo «Yuston» Publ., 2016. 276 p.
4. Voropaev G. A., Zayner-Gundersen D., Korobov V. I. *Gidrodinamicheskie kharakteristiki koleblyushhegosya kryla* [Hydrodynamic characteristics of an oscillating wing]. *Prikladnaya gidromekhanika* [Applied hydromechanics]. 2015, vol. 17, no. 3, pp. 3–9.
5. Young J., Lai J., Platzer M. A review of progress and challenges in flapping foil power generation. *Prog. Aerosp. Sci.* 2014, vol. 67, pp. 2–28.
6. Kaya M., Elfarra M. CFD based optimization of oscillatory wing motion for maximum energy harvesting from wind. *Int. J. Renewable Energy Research*. 2018, vol. 8, no. 1, pp. 540–551.
7. Jasak H. OpenFOAM : open source CFD in research and industry. *Int. J. Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009, vol. 1, no. 2, pp. 89–94.
8. Voropaev G. A., Zagumennyi Ya. V., Shkvar Ye. A. Vortex formation on an oscillating wing. *Proc. 8-th Int. Conf. on Vortex Flows Dynamics*. Xi'an, China, 2018. pp. 25–26.

Поступила (received) 18.03.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Воропаєв Генадій Олександрович (Воропаев Геннадий Александрович, Voropaiev Genadi Olexandrovich)** – доктор фізико-математичних наук, професор, член-кор. НАНУ, Інститут гідромеханіки НАНУ, м. Київ; тел.: (044) 371-65-17; e-mail: voropaiev.gena@gmail.com.

**Загумений Ярослав Вікторович (Загуменный Ярослав Викторович, Zagumennyi Yaroslav Viktorovich)** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: zagumennyi@gmail.com.

УДК 532.526

**Г. А. ВОРОПАЕВ, Н. В. РОЗУМНЮК****МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Представлены результаты численного моделирования трехмерного нестационарного турбулентного течения над поверхностью с системой парных лунок в широком диапазоне чисел Рейнольдса. На основании полученных численных результатов определены требования к луночному рельефу, генерирующему парные квазистойчивые продольные вихри в заданном диапазоне чисел Рейнольдса. Определено влияние геометрических параметров лунок и числа Рейнольдса на динамические характеристики обтекаемой поверхности. Показано стабилизирующее влияние продольных вихревых образований на характеристики турбулентного пограничного слоя в следе за системой лунок.

**Ключевые слова:** турбулентный пограничный слой, парные лунки, продольные вихри, гидродинамические потери.

**Г. О. ВОРОПАЄВ, Н. В. РОЗУМНЮК****МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ НА СТРУКТУРОВАНІЙ ПОВЕРХНІ**

Представлено результати чисельного моделювання тривимірної нестационарної турбулентної потоку над поверхнею з системою парних лунок в широкому діапазоні чисел Рейнольдса. На основі одержаних чисельних результатів визначено вимоги до луночного рельєфу, який генерує парні квазістійкі поздовжні вихори в заданому діапазоні чисел Рейнольдса. Визначено вплив геометричних параметрів лунок та числа Рейнольдса на динамічні характеристики обтічної поверхні. Показано стабілізуючий вплив поздовжніх вихрових утворень на характеристики турбулентного прилежового шару в сліді за системою лунок.

**Ключові слова:** турбулентний прилежовий шар, парні лунки, поздовжні вихори, гідродинамічні втрати.

© Г. А. Воропаев, Н. В. Розумнюк, 2019

G. A. VOROPAIEV, N. V. ROZUMNYUK

## MODELING OF NON-STATIONARY BOUNDARY LAYER OVER A STRUCTURED SURFACE

The results of numerical modeling of 3D unsteady turbulent flow over a surface with a system of paired dimples are presented in a range of Reynolds numbers. On the basis of the numerical results the required parameters of dimples capable of generating quasi-steady longitudinal vortices in the given Reynolds numbers range are determined. The effect of dimples' shape and Reynolds number on the dynamic characteristics of the surface are identified. The stabilizing influence of longitudinal vortical structures of the boundary layer in the wake streamwise is shown.

**Key words:** turbulent boundary layer, pairs of dimples, longitudinal vortices, hydrodynamic losses.

**Введение.** Задачи управления потоками для уменьшения сопротивления, увеличения подъемной силы, предотвращения отрыва потока от поверхности и т.д., как правило, связаны с управлением характеристиками пограничных слоев, формирующихся на поверхности тел, которое может осуществляться активными или пассивными методами [1]. Активные методы управления подразумевают дополнительные энергетические затраты для целенаправленного изменения характеристик течения в процессе эксплуатации обтекаемого объекта.

*Пассивные методы*, такие как *LEBU*, *риблеты*, *луночные рельефы*, не требуют дополнительных затрат, а требуемые изменения параметров обтекания достигаются за счет заранее внесенных модификаций формы/конструкции поверхности.

Характерные масштабы вихревых структур, генерированных обтекаемой поверхностью, их интенсивность в значительной степени определяют количественные значения величин аэрогидродинамического сопротивления движущихся тел. На изменение этих характеристик направлены различные методы управления [2, 3]. Так, *LEBU* разрушает структуру крупных поперечных вихрей, которые формируются во внешней части турбулентного пограничного слоя, а *риблеты*, наоборот, влияют на структуру мелких пристенных продольных вихрей, повышая их устойчивость. В противоположность идеологии *LEBU*, когда в пограничном слое разрушаются большие вихри, существует идеология генерации вихрей для изменения вихревой структуры турбулентного пограничного слоя при помощи разнообразных генераторов вихрей, создающих в пристенной области вихри разной ориентации и интенсивности.

Управлению вихревой структурой потока вблизи поверхности для усиления тепло- и массообмена за счет вихревого перемешивания посвящено большое количество современных исследований. Однако усиление теплообмена практически всегда сопровождается увеличением сопротивления, поэтому для таких приложений важной задачей является минимизация гидродинамических и гидравлических потерь.

**Анализ последних исследований.** В настоящее время уже общепризнано, что детерминированные продольные вихревые структуры определенных масштабов способны регуляризовать структуру турбулентности пограничного слоя, аккумулируя *энергию трансверсальной завихренности в продольную*, и снижать сопротивление трения, но предотвращая отрыв. Поэтому задача генерации устойчивых продольных вихревых структур масштабов, согласованных с характеристиками пограничного слоя, с минимальными затратами, приобрела самостоятельное значение.

Подавляющее большинство работ рассматривают симметричные (полусферические, каплеобразные, и т.п.) одиночные лунки и их массивы в различных компоновках, которые хаотизируют течение и предотвращают образование крупномасштабных когерентных структур [4]. В полусферических лунках возникает режим нерегулярной генерации и выброса вихрей по ширине лунки. Внесение несимметрии в форму лунки или ее расположение в трансверсальном направлении позволяет генерировать одиночный продольный вихрь в ее следе [5] с определенным направлением вращения. Это дает возможность создавать регулярные продольные вихревые структуры на структурированной поверхности, основным элементом которой являются пары удлиненных лунок обусловленной формы и размеров, расположенные под определенным углом друг к другу [6, 7]. В этом случае за лунками возникает пара устойчивых продольных вихрей, вращающихся в противоположных направлениях.

В данной работе исследуется возникновение и развитие вихревых структур, генерированных системой лунок, и их влияние на параметры турбулентного пограничного слоя на плоской поверхности в зависимости от относительной глубины лунки при разных *числах Рейнольдса*.

**Постановка задачи.** Численно исследуется вязкое течение несжимаемой жидкости на поверхности плоской пластины с парами лунок, расположенных под углом к направлению основного потока. Решается стандартная система уравнений неразрывности, уравнений Рейнольдса, с применением модели переноса напряжений для моделирования турбулентности, *используется пакет FLUENT*.

Расчетная область представляет собой параллелепипед, в основании которого лежит пластина с лунками. Лунки образованы следующим способом. Тело, состоящее из цилиндрической средней части и полусфер такого же диаметра на торцах, вдавливается на нужную глубину в плоскость.

В области строится ортогональная расчетная сетка, которая имеет сильное сгущение в вертикальном направлении возле поверхности пластины, в горизонтальном направлении – в окрестности лунок и их следе, внутри лунок сетка конформна с их поверхностью. Общее количество расчетных узлов во всей области достигало 8 млн., их пространственное размещение варьировалось для достижения удовлетворительного сравнения с известными теоретическими и экспериментальными данными для обтекания пластины при соответствующих параметрах потока.

Расчетная область имеет длину 1.5 м, высоту 0.2 м, лунки располагаются на расстоянии 0.5 м от входной границы области.

На входе ставились условия равномерного потока, на боковых гранях – условия симметрии потока, на верхней границе – скользящая стенка.

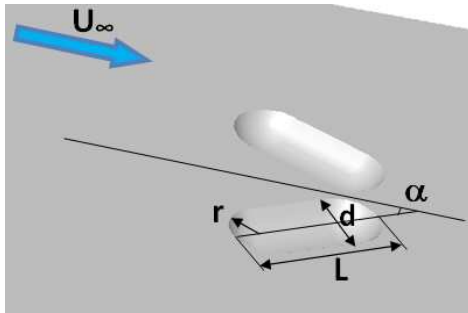


Рис. 1 – Схема расположения лунок на плоской поверхности.

При обтекании пластины потоком воды при температуре 300 К со скоростью  $1 \div 3$  м/с число Рейнольдса по длине пластины до начала лунок равно  $5 \cdot 10^5 \div 1.5 \cdot 10^6$ , течение считается турбулентным с заданным уровнем турбулентности 1 %.

В данной работе представлены результаты расчета течения при следующих параметрах лунок: длина  $L = 49$  мм, ширина  $d = 12$  мм, минимальное расстояние между лунками 6 мм (рис. 1). Лунки в парах развернуты в сторону набегающего потока под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Рассматривались два типа лунок с разным отношением глубины цилиндрической части к ширине: лунка А ( $h/d = 0.64$ ) и лунка В ( $h/d = 0.53$ ). В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса толщина пограничного слоя перед лунками составляла  $\sim 10 \div 12$  мм, то есть

глубины лунок составляли примерно половину толщины пограничного слоя.

**Результаты моделирования.** Моделирование выполнялось в нестационарном режиме, анализировались параметры течения после установления квазипериодического режима с малыми амплитудами колебаний в лунках и их следе, зависящими от типа лунки и скорости потока. Основные структуры течения в районе лунок представлены на рисунках для скорости потока 3 м/с; их можно описать следующим образом.

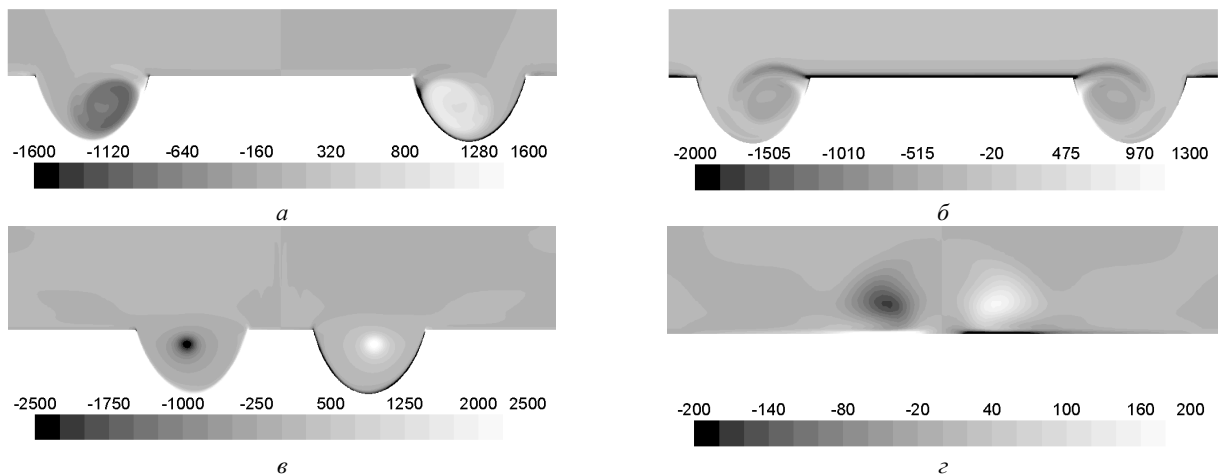


Рис. 2 – Компоненты завихренности в поперечных сечениях лунки А: а – продольная и б – трансверсальная при  $x = 1$  см; в – продольная при  $x = 3$  см; г – продольная в следе за лунками,  $x = 8$  см.

Натекающий на лунки пограничный слой отрывается с кромок лунок, образуя сдвиговый слой, который хорошо видно по значениям трансверсальной и продольной завихренности в поперечных сечениях лунок, представленных на рис. 2, а, б и рис. 3, а, б. Под сдвиговым слоем возле передней полусферической стенки лунки формируется вихрь. Как можно видеть по линиям растекания на поверхности лунки на рис. 4, а и рис. 5, а, фокус вихря на поверхности лунки смещен к подветренной боковой стороне и верхней кромке лунки, где нормаль к поверхности лунки почти перпендикулярна направлению внешнего потока.

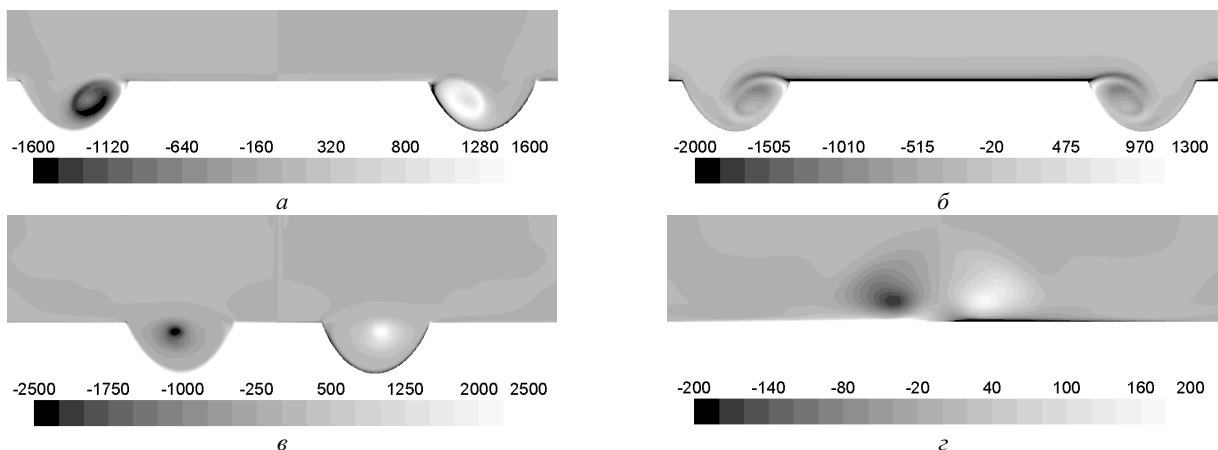


Рис. 3 – Компоненты завихренности в поперечных сечениях лунки В: а – продольная и б – трансверсальная при  $x = 1$  см; в – продольная при  $x = 3$  см; г – продольная в следе за лунками,  $x = 8$  см.

Траектории меченых частиц, выпущенных в носовой части лунки (рис. 4, б, рис. 5, б) показывают, что далее вихрь опускается глубже в лунку и повторяет форму подветренной стенки лунки.

По изолиниям давления на поверхности лунки (рис. 6) видно, что в ее передней части давление понижается; продольная компонента трения (рис. 7) становится отрицательной на всей полусферической части, где возникает зона возвратного течения.

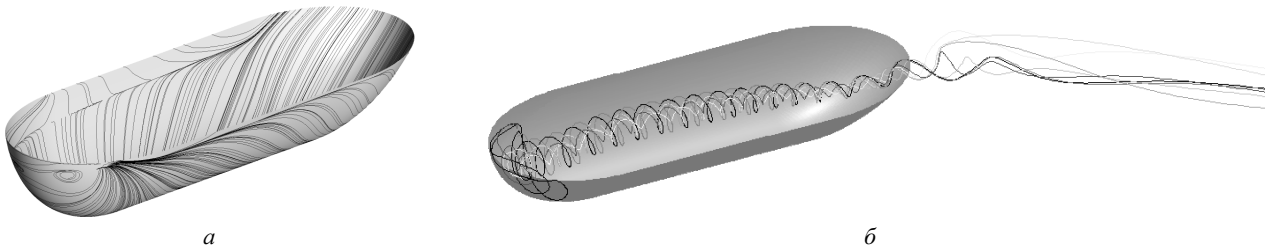


Рис. 4 – а – Линии растекания по поверхности; б – траектории меченых частиц в лунке А (течение слева направо).

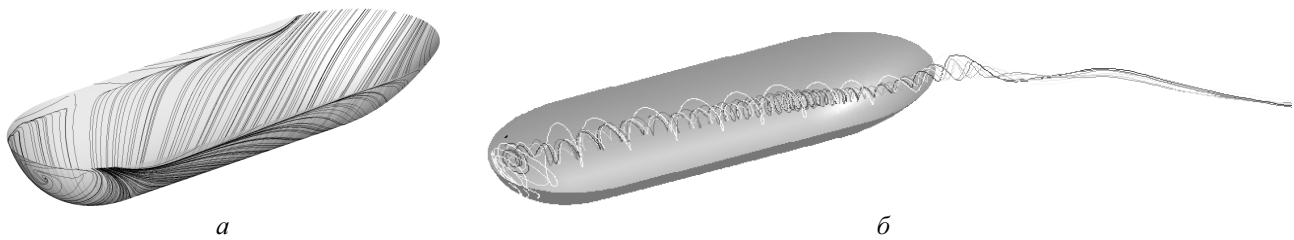


Рис. 5 – а – Линии растекания по поверхности; б – траектории меченых частиц в лунке В (течение слева направо).

При переходе от передней сферической к цилиндрической части лунки, вихрь изгибается и выстраивается вдоль подветренной стенки. Поперечный размер вихря определяется глубиной лунки (рис. 2, а, рис. 3, а), в лунке А ( $h/d = 0.64$ ) он, соответственно, больше, а максимальная величина завихренности выше в лунке В ( $h/d = 0.53$ ). В лунке А ось вихря находится глубже.

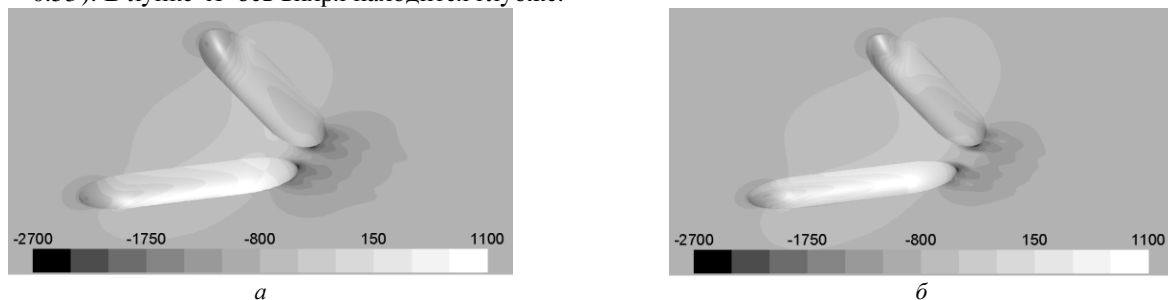


Рис. 6 – Давление на поверхности в районе лунок: а – лунки А ; б – лунки В (течение слева направо).

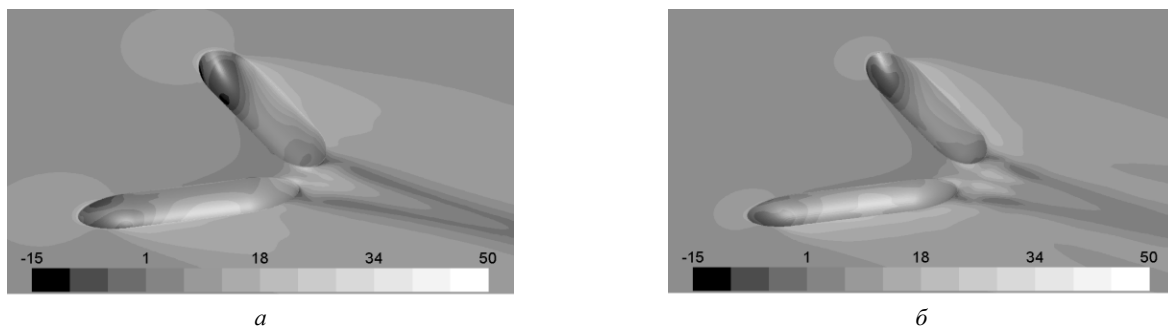


Рис. 7 – Продольное трение на поверхности в районе лунок: а – лунки А ; б – лунки В (течение слева направо).

Сдвиговый слой оттесняется вверх периферией вихря и переносится к наветренной стенке лунки, где он взаимодействует с кромкой лунки, часть его захватывается вихревым движением и уносится внутрь лунки, а часть уходит вниз по течению, формируя пограничный слой на пластине. Поэтому на подветренной стенке трение меньше, чем на пластине перед лункой, а на наветренной стенке лунки трение повышается (рис. 7). Давление возле острых кромок лунок выше, чем в глубине лунки, и везде растет в направлении к кормовой части (рис. 6).

Траектории меченых частиц формируют спирали, идущие вдоль оси симметрии лунки (рис. 4, б, рис. 5, б). Перемещаясь вдоль лунки, радиусы спиралей уменьшаются, расстояние между витками и диаметр ядра умень-

шается, а максимальная завихренность увеличивается. Сложная форма ядра вихря, наблюдаемая в передней части лунки, преобразуется в продольный цилиндрический вихрь с максимальной завихренностью в центре (рис. 2, в, рис. 3, в). В лунке *A* это происходит раньше, чем в более мелкой лунке *B*.

Ближе к кормовой части пары лунок давление на подветренных стенках лунок становится выше, чем на наветренных стенках, и постепенно оттесняет продольные вихри от внутренних стенок к внешним, что можно видеть и по траекториям меченых частиц (рис. 4, б, рис. 5, б), и по изолиниям продольной завихренности в поперечных сечениях лунок (рис. 2, 3). Перед кормовой полусферической частью лунки давление возрастает на дне лунки (рис. 6), продольный вихрь выталкивается вверх. Таким образом, из лунок вихри выходят возле внешних участков кормовой стенки. Между ними образуются вторичные вихри противоположных знаков завихренности, которые быстро затухают на небольшом расстоянии вниз по потоку.

За кормовыми кромками можно видеть зоны микроотрыва с отрицательным трением там, где продольные вихри выходят из лунок (рис. 7). Следы этих вихрей в виде полосок уменьшенного трения наблюдаются и вниз по потоку. Между этими полосками на небольшом расстоянии за лунками, где в потоке образуются вторичные вихри между основными вихрями, трение повышается до места сближения основных вихрей и слияния их следов в один на расстоянии, равном длине лунки. Сформировавшаяся пара продольных вихрей занимает всю толщину пограничного слоя и хорошо различима на расстоянии до десяти длин лунок, хотя максимальная завихренность падает на два порядка по сравнению с максимальной завихренностью в лунке.

Максимальные величины давления и трения достигаются на узком верхнем участке наветренной стенки возле кромки (рис. 7, а), где стенка расположена вертикально. В глубокой лунке *A* эти значения выше, чем в лунке *B*, и как следствие, уменьшение глубины лунки *B* значительно уменьшило гидродинамические потери, при этом максимальная завихренность в центрах продольных вихрей в двух лунках практически одинакова и в кормовых частях лунок, и в следе за ними (рис. 2, з, рис. 3, з).

На поверхности пластины перед носиками и вокруг полусферических входных стенок лунок давление падает, а вокруг цилиндрических частей увеличивается, особенно на сужающемся участке между лунками (рис. 5). За кормовой кромкой давление резко падает и ниже по течению наблюдается пятно пониженного давления. Продольная компонента трения (рис. 7) увеличивается перед носиками лунок, а также за наветренными стенками лунок, где формируется новый пограничный слой, и понижается между лунками ближе к кормовым частям, где присутствие лунок и генерированных ими вихрей оттесняет внешний поток от поверхности лунок, уменьшая нормальный градиент скорости. Таким образом, глубокие лунки больше деформируют поле течения на пластине по сравнению с мелкой лункой.

Таким образом, оба типа лунок генерируют практически одинаковые по размерам и интенсивности продольные вихри в пограничном слое за ними, но воздействие на интегральные характеристики обтекаемой поверхности при наличии таких лунок существенно разное. В табл. 1 приведены величины компонентов сопротивления за счет формы (давления) и трения, и общее сопротивление одной лунки. Как можно видеть, сопротивление давления намного выше сопротивления трения, поскольку оба типа лунок являются относительно глубокими и увеличивают сопротивление этого участка по сравнению с аналогичным участком плоской поверхности. Но обе компоненты сопротивления значительно меньше у более мелкой лунки *B*, а ее общее сопротивление в 1.6 раза меньше, чем у лунки *A*.

Таблица 1 – Сопротивление одной лунки [N]

	$F_1$ (давление)	$F_1$ (трение)	$F$
Лунка <i>A</i>	0.0833	0.0091	0.0924
Лунка <i>B</i>	0.0502	0.0064	0.0566

Влияние нестационарности проявляется в том, что в лунках происходят небольшие периодические отклонения размещения вихря в лунке, которые приводят к пульсированию зоны микроотрыва на кормовых кромках и продольных вихрей непосредственно за лунками. В исследованном диапазоне скоростей эти колебания практически неразличимы в лунке *A*, где большая глубина стабилизирует вихрь. В более мелкой лунке *B* вихрь менее устойчив, осцилляции ядра вихря заметны не только в кормовой части лунки, но и выше. Амплитуды этих осцилляций увеличиваются при увеличении скорости потока.

**Перспективы дальнейших исследований.** Авторы считают перспективными исследования влияния на гидродинамические характеристики пары лунок, взаимосвязи глубины лунки и угла ее отклонения от направления потока.

**Выводы.** На основании проведенного исследования можно утверждать, что в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса и геометрических параметров пары лунок возможно оптимизировать глубину лунки для создания системы продольных вихрей определенных размеров и интенсивности при минимальном изменении гидродинамического сопротивления обтекаемой поверхности.

#### Список литературы

1. Gad-el-Hak M. Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management. – Cambridge, UK : Cambridge Univ. Press, 2000. – 421 p.
2. Cattafesta L. N., Sheplak M. Actuators for active flow control // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2011. – Vol. 43. – P. 247 – 272.
3. Alfredsson P. H., Örlü R. Large-Eddy BreakUp devices – a 40 years perspective from a Stockholm Horizon // Flow Turbulence Combust. – 2018. – Vol. 100. – No. 4. – P. 877 – 888.

4. Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2012. – Vol. 35. – P. 168 – 175.
5. Isaev S. A., Schelchikov A. V., Leontiev A. I., Gortyshov Yu. F., Baranov P. A., Popov I. A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – № 109. – P. 40 – 62.
6. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators // *Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting "EDRFCM 2010" 2–4 September, 2010*. – Kyiv, Ukraine, 2010. – P. 32 – 33.
7. Ворopaев Г. А., Розумнюк Н. В. Формирование квазистойчивых продольных вихревых структур в пристенных течениях на структурированных поверхностях // *Комп'ютерна гідромеханіка : тези шостої міжнар. науково-практичної конф. 26 – 27 вересня 2018 р.* – Київ : ІГМ НАНУ, 2018. – С. 18 – 19.

## References (transliterated)

1. Gad-el-Hak M. *Flow Control : Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge, UK, Cambridge Univ. Press, 2000. 421 p.
2. Cattafesta L. N., Sheplak M. Actuators for active flow control. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2011, vol. 43, pp. 247–272.
3. Alfredsson P. H., Örlü R. Large-Eddy BreakUp devices – a 40 years perspective from a Stockholm Horizon. *Flow Turbulence Combust.* 2018, vol. 100, no. 4, pp. 877–888.
4. Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2012, vol. 35, pp. 168–175.
5. Isaev S. A., Schelchikov A. V., Leontiev A. I., Gortyshov Yu. F., Baranov P. A., Popov I. A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, no. 109, pp. 40–62.
6. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators. *Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting "EDRFCM 2010" 2–4 September, 2010*. Kyiv, Ukraine, 2010. pp. 32–33.
7. Voropaev G. A., Rozumnyuk N. V. Formirovaniye kvaziustoychivyykh prodol'nykh vikhrevykh struktur v pristenochnykh techeniyakh na strukturirovannykh poverkhnostyakh [Development of quasi-stable longitudinal vortex structures in the near-wall flows over structured surfaces]. *Komp'yuterna gidromekhanika : tezy shostoyi mizhnar. naukovopraktychnoyi konf. 26–27 veresnya 2018 r.* [Computer hydromechanics : Proceedings of the 6-th International Scientific and Practical Conference, Kyiv, September 26 – 27, 2018]. Kyiv, IGM NANU Publ., 2018. pp. 18–19.

Поступила (received) 16.03.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Ворopaев Геннадій Олександрович (Voropaev Gennadii Oleksanrovic)** – доктор фізико-математичних наук, професор, заступник директора, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ; (044) 371-65-18; e-mail: voropaev.gena@gmail.com.

**Розумнюк Наталія Вячеславівна (Rozumnyuk Nataliya Vyacheslavivna)** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-39; e-mail: nrozumnyuk@yahoo.com.

УДК 532.5:534.7

**В. А. ВОСКОБОЙНИК, А. А. ВОСКОБОЙНИК, В. Н. ТУРИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК****МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР ПАРОЙ ОВАЛЬНЫХ ЛУНОК**

Приведены результаты физического моделирования генерации устойчивых противоположно вращающихся вихревых структур парой наклоненных к направлению потока овалных лунок. Проведены визуальные и инструментальные исследования, а также статистический анализ полей пульсаций давления вихревого течения, образованного парой овалных лунок на гидравлически гладкой плоской поверхности. Определены особенности генерации противоположно вращающихся вихревых структур лунками и их гидродинамические характеристики. Установлены места зарождения, формирования и развития вихревых структур в зависимости от режимов течения, а также области выброса вихрей в пограничный слой. Получены интегральные и спектральные характеристики пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности лунок и пластины. Определены частоты вращения вихревых структур и их выбросов наружу из наклоненных овалных лунок.

**Ключевые слова:** овальная лунка, вихревая структура, визуализация течения, пульсации скорости и давления, статистический анализ.

**В. А. ВОСКОБОЙНИК, О. А. ВОСКОБОЙНИК, В. М. ТУРИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК****МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ВИХРОВИХ СТРУКТУР ПАРЮЮ ОВАЛЬНИХ ЛУНОК**

Наведено результати фізичного моделювання генерації стійких протилежно обертових вихрових структур парою нахилених до напрямку течії овалних лунок. Проведено візуальні та інструментальні дослідження, а також статистичний аналіз полів пульсацій тиску вихрової течії, яка була утворена парою овалних лунок на гідралічно гладкій плоскій поверхні. Визначено особливості генерації протилежно обертових вихрових структур лунками та їх гідродинамічні характеристики. Установлено місця зародження, формування і розвитку вихрових структур в залежності від режимів течії, а також області викидів вихорів у прилеглий шар. Отримано інтегральні та спектральні характеристики пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунок і пластины. Визначені частоти обертання вихрових структур та їх викидів назовні з нахилених овалних лунок.

**Ключові слова:** овальна лунка, вихрова структура, візуалізація течії, пульсації швидкості та тиску, статистичний аналіз.